

李欣, 王宁晓璇, 梅源, 等. 新型非热杀菌技术在发酵果蔬制品中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 400–408. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090007

LI Xin, WANG Ningxiaoxuan, MEI Yuan, et al. Research Progress on the Application of Novel Non-thermal Sterilization Technologies in Fermented Fruit and Vegetable Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 400–408. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090007

· 专题综述 ·

新型非热杀菌技术在发酵果蔬制品中的应用研究进展

李欣^{1,2}, 王宁晓璇^{1,2}, 梅源², 黄玉立², 曾雪晴², 葛黎红^{1,*}, 赵楠^{2,*}

(1. 四川师范大学生命科学学院, 四川成都 610101;

2. 四川省农业科学院农产品加工研究所, 四川成都 610066)

摘要: 发酵果蔬制品是我国传统发酵食品的重要组成部分。制作时, 以新鲜蔬菜、水果为原料, 利用其自然携带的乳酸菌、真菌等多种菌群相互作用进行发酵。发酵完成后, 蔬菜中微生物组成和数量的失控常引起后酸化、软烂、腐败变质等问题, 因而开发适用于发酵果蔬制品的杀菌技术具有重要的产业价值。相较于传统热杀菌的破坏作用, 采用非加热方式的新型非热杀菌技术不仅可以针对性地杀灭致腐、致病微生物, 还能降低对益生菌的影响, 并极大地减缓发酵果蔬制品产品劣化, 因而逐渐成为发酵果蔬制品杀菌领域的研究热点之一。本文综述了常用新型非热杀菌技术在发酵果蔬制品中的应用研究进展, 对新型非热杀菌技术在发酵果蔬制品中的微生物的作用及影响因素进行概述, 并探讨其对产品质量属性及安全属性的影响, 以期为非热杀菌技术在发酵果蔬制品工业化生产中的规模化应用提供理论依据。

关键词: 发酵果蔬制品, 新型非热杀菌技术, 微生物, 质量, 安全

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)15-0400-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090007



本文网刊:

Research Progress on the Application of Novel Non-thermal Sterilization Technologies in Fermented Fruit and Vegetable Products

LI Xin^{1,2}, WANG Ningxiaoxuan^{1,2}, MEI Yuan², HUANG Yuli², ZENG Xueqing², GE Lihong^{1,*}, ZHAO Nan^{2,*}

(1. College of Life Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China;

2. Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: Fermented fruit and vegetable products are an important part of traditional fermented food in China. During production, fresh vegetables and fruits are used as raw materials. The fermentation is conducted by the interactions between microorganisms including lactic acid bacteria and fungi which are naturally carried by raw materials. After fermentation, the composition and quantity of microorganisms in fruits and vegetables tend to become out of control, which often leads to post-acidification, softening, spoilage and other problems. Therefore, the development of sterilization technology suitable for fermented fruit and vegetable products has important industrial value. Compared with the destructive effect of traditional heat sterilization, the non-thermal sterilization technology without heating can not only kill the spoilage and pathogenic microorganisms, but also reduce the impact on probiotics, and greatly alleviate the deterioration of fermented fruit and vegetable products. Therefore, non-thermal sterilization technologies have gradually become one of the research hotspots in the field of fermented fruit and vegetable products sterilization. In this paper, the application progress of

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 四川省重点实验室开放基金 (SZKF2214); 四川省自然科学基金 (2022NSFSC1648)。

作者简介: 李欣 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 发酵食品生物技术, E-mail: 1474445306@qq.com。

* 通信作者: 葛黎红 (1989-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 发酵食品生物技术, E-mail: gelihong89@163.com。

赵楠 (1985-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 发酵食品生物技术, E-mail: demonzn115@163.com。

common non-thermal sterilization technologies in fermented fruit and vegetable products is reviewed. The sterile effect and influencing factors of non-thermal sterilization technologies in fermented fruit and vegetable products are summarized. Its influence on quality and safety attributes of products is discussed. The aim of this study is to provide a theoretical basis for the large-scale application of non-thermal sterilization technologies in the industrial production of fermented fruit and vegetable products.

Key words: fermented fruit and vegetable products; non-thermal sterilization technologies; microorganisms; quality; safety

发酵果蔬制品作为我国传统发酵食品的重要组成部分,主要以新鲜果蔬作为原料,利用果蔬自身携带或加入乳酸菌、真菌等微生物菌群作用发酵,最后制成泡菜、果蔬发酵汁等产品^[1-2]。发酵果蔬制品不仅具有独特的风味、爽口的质地、鲜艳的色泽等特殊感官性质,还保留了果蔬原有的维生素、膳食纤维等营养元素,让其成为了人们餐桌上不可或缺的美食^[3]。然而,由于果蔬原料自身携带微生物,在发酵、包装及贮运过程中菌群组成和数量不断变化且难以控制,常出现过酸、胀气等现象,不仅影响产品品质,也存在安全性风险,常需要对果蔬原料及成品进行杀菌。常规热杀菌方法往往因其过高的热强度对果蔬感官和营养品质产生负面影响,因此适用于发酵果蔬的非热杀菌技术的发展创新对产品品质提升、货架期延长以及销售范围扩大具有重要作用^[4-6]。

新型非热杀菌技术大部分是在物理方法的基础上衍生发展起来的一类新技术,在稳定产品质量属性和安全属性的前提下有效抑制有害微生物的生长^[7]。新型非热杀菌技术大多采用声光电等高能光波或射线对微生物进行杀灭,适用于果蔬固体和液体食品的保鲜、包装减菌延长贮藏期,主要包括超高压杀菌技术、脉冲电场杀菌技术、脉冲强光杀菌技术、低温等离子体杀菌技术、高密度二氧化碳等^[8-9]。这些非热杀菌技术单独或组合应用于食品加工时,表现出了优异的杀菌选择性和特异性,其杀菌效果主要受到温度、pH 等环境因素及设备参数等技术因素的影响,通过环境因素与技术参数的配合调控,可提升杀菌选择性和特异性以优化杀菌效果^[10]。此外,非热杀菌技术具有延缓发酵果蔬汁、泡菜等果蔬制品中维生素、膳食纤维等营养成分损失的作用,在保持发酵莲藕片、泡萝卜等发酵果蔬产品原有风味物质组成、抑制色泽褐变、减缓质地软烂的情况下,显著降低生物胺和亚硝酸盐等食品安全危害因素的积累,因而在发酵果蔬制品原料、成品杀菌方面均表现出了广阔的应用潜力^[5,11]。

本文综述了近年来常见新型非热杀菌技术在发酵果蔬制品中的应用研究,从杀灭有害微生物菌群以及对益生菌菌群的影响两个方面对微生物的作用进行阐释,总结了影响杀菌效果的环境因素和技术因素,并概述了新型非热杀菌技术对发酵果蔬制品的感官属性及安全属性的影响,以期新型非热杀菌技术在发酵果蔬制品产业中的规模化应用提供理论依据。

1 新型非热杀菌技术概述

不同于传统热杀菌技术的热强度对食品的破坏作用,新型非热杀菌技术大多利用物理手段,采用高压、电场、磁场、射线等非加热形式使生物分子细胞壁、细胞膜及细胞相关生化功能发生改变,起到杀菌、钝酶以及改变食品结构及功能特性的作用,能最大限度维持食品感官和营养成分,延长货架贮藏期^[12]。新型非热杀菌技术是工程技术、物理学、化学和微生物学结合的交叉学科,近年来已被广泛应用于肉类^[13]、水产品^[14]、果蔬^[15]、乳类^[16]等食品的保鲜、包装成品减菌等方面,是最具潜力的灭菌新技术。**表 1**总结了近年来国内外研究者较为关注的几种新型非热杀菌技术灭菌机理及特点。

随着消费者对高品质、高营养果蔬食品的多样化需求增加,新型非热杀菌技术逐渐成为了食品加工新技术的焦点。在果蔬中的研究主要集中于如何在保证食品感官、营养的前提下对不同类型果蔬食品的原料保鲜及包装成品上实现高效杀菌,延长保质期。目前国内外研究已证明新型非热杀菌技术在果蔬液体和固体食品已有显著的杀菌效果。研究显示,超高压杀菌、高压脉冲电场杀菌、超声波杀菌、微波杀菌等利用高压力学、电学、磁学作用机理,具有高效、无残留、热效应低、作用均匀等优势适用于果蔬液体制品杀菌中,保障“原汁原味”。如 Buitimea-Cantúa 等^[25]利用了 HPP 和 PEF 技术在高压及强电场下作用于覆盆子汁,可明显抑制覆盆子汁中的霉菌和酵母生长,改善极易变质的覆盆子汁的品质;让一峰等^[26]利用高压脉冲电场可以短时间、低能耗、高效率地对哈密瓜汁进行强化杀菌,不仅能杀灭引起变质的微生物,还对其理化指标基本无影响;Danshi 等^[27]利用微波、超声波、超高压灭菌技术几种技术处理发酵苹果汁,不仅能在不同程度上杀灭微生物,还能保证发酵苹果汁的特色风味。脉冲强光杀菌、电子束辐射杀菌、高密度二氧化碳杀菌、低温等离子体的研究大多集中于果蔬固体原料杀菌及产品包装上,如韦雪等^[28]探究了脉冲强光联合气调包装对鲜切马铃薯杀菌的影响,在 12 J/cm² 的脉冲强光下还能维持马铃薯的硬度和原有滋味。孟宪伟等^[29]使用低温等离子体技术处理鲜切胡萝卜,对胡萝卜无损伤,并能明显延缓品质劣变。侯新磊等^[30]利用低温等离子体技术于四川泡菜中,结果显示,低温等离子体明显抑制泡菜贮藏过程中腐败微生物的生长。Lee 等^[31]利用 HPP 技术处理包装后的韩国泡菜,能

表 1 常用新型非热杀菌技术的类型及特点

Table 1 Common types and characteristics of novel non-thermal sterilization technologies

杀菌技术	灭菌机理	特点	参考文献
超高压杀菌 (high pressure processing, HPP)	通常在100~1000 MPa压力下,改变分子间距,破坏微生物结构、酶的构象。	速度快、均匀	[17]
高压脉冲电场杀菌 (pulsed electric field, PEF)	强电场脉冲使细胞膜穿孔,导致胞内物质泄漏流出,微生物生理生化终止。	功率消耗低、 强穿透力	[4,18]
脉冲强光杀菌 (pulsed intense light, PL)	利用紫外线至红外线区域(100~1100 nm)的广谱波长的强脉冲和短脉冲杀灭微生物。	瞬时、强效、节能、易控	[19]
超声波杀菌 (ultrasonic sterilization, US)	超声波空化效应导致微生物结构损伤。	易于操作、成本低廉	[20]
电子束辐射杀菌 (radio sterilization)	UV、X、 γ 射线使微生物分子化学键断裂或直接破坏细胞结构。	高效、耗时短	[21]
微波灭菌技术 (microwave, MW)	频率在300 MHz~300 GHz的电磁波与微生物蛋白质等物质发生耦合,破坏微生物组成。	速度快、节能、易控	[22]
低温等离子体灭菌技术 (cold plasma technology, CPS)	高压电极间放电产生活性粒子、光辐射、冲击波等复合物理化学效应破坏微生物结构。	能耗低、效率高、无污染	[23]
高压/高密度二氧化碳杀菌 (high pressure carbon dioxide, HPCD)	加压增加CO ₂ 密度,使CO ₂ 渗透到细胞中发生酸化效应,降低胞内pH,破坏细胞膜,导致微生物失活。	新型高效、绿色、可持续	[24]

明显消除不利微生物的生长,延长泡菜保质期。Zambon 等^[32]利用二氧化碳作为香菜叶、胡萝卜、椰子三种果蔬的包装填充气体,并高压处理使其达到超临界二氧化碳条件,结果表明高压二氧化碳可有效减缓包装后的微生物生长并能延长新鲜果蔬的货架期。

尽管国内外专家已经研究证明了新型非热杀菌技术在果蔬食品上的潜在用途,但其还存在一些局限性,仍需不断深入研究,使其达到商业化需求。

2 新型非热杀菌技术对发酵果蔬制品中微生物的作用及影响因素

2.1 新型非热杀菌技术对发酵果蔬制品中微生物的作用

果蔬常因含水量高、营养物质丰富、植物组织易损而容易被微生物污染,在发酵、包装、贮运等加工过程中微生物组成和数量也会不断变化,导致果蔬发酵制品发生腐败变质。冷藏是发酵果蔬制品贮藏的常用方法,其原理是低温可以抑制产品中有害微生物的生长、降低酶活性、减缓生化反应的发生,但冷藏同时也会在一定程度上抑制乳酸菌的发酵,对发酵果蔬的风味、营养等产生一定的负面影响^[33]。随着发酵蔬菜的“低盐”、发酵果蔬汁的“健康”越发受到消费者的青睐,新型非热杀菌技术能对有害微生物进行干预并保留有益微生物稳定发酵品质成为了优势。

2.1.1 新型非热杀菌技术对有害微生物的作用 发酵果蔬制品是指以一种或多种新鲜水果、蔬菜为原料,经过酵母菌、乳酸菌等多种有益菌发酵而成的功能性发酵食品,主要有泡菜、发酵果蔬汁等。由于果蔬原料自身携带或发酵加工过程中污染致病或致病微生物,会引发公共卫生问题,带来巨大经济负担。因此迫切需要通过适当的加工方法来提高发酵果蔬制品的微生物安全性。新型非热杀菌技术可破坏腐败菌和致病菌等有害微生物的结构,从而保障果蔬发酵品质。近期研究表明,新型非热杀菌技术在对发酵果蔬原料进行杀菌时表现出了优越的微生物特异性和针对性,对果蔬中存在的有害微生物进行杀灭或减

除,如表 2 所示。

研究显示,新型非热杀菌技术在合理的参数条件下对有害菌的杀菌率最大可降低大约 5 lg CFU/g 的要求,延长了发酵果蔬制品的保质期并提高了食品安全性,在发酵果蔬制品灭菌上具有巨大潜力。首先,新型非热杀菌技术能明显抑制致腐微生物的生长。如超高压技术可以降低加速胡萝卜汁风味劣化的酿酒酵母的生长^[42],低温等离子体可以减少泡菜“生花”的膜醭毕赤酵母的数量^[43],超高压技术、高压二氧化碳技术、高压脉冲电场技术、紫外辐照技术独立或相结合处理,可有效减少“顽固”的芽孢杆菌的数量^[44]。其次,还可以杀灭果蔬来源的致病性大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、单核细胞增生李斯特菌、沙门氏菌等致病微生物^[45]。如 Lee 等^[31]研究了超高压灭菌技术在 600 MPa 下处理韩国叶用芥菜泡菜,处理后大肠杆菌的初始数量低于检测限度(1 lg CFU/g)。Pan 等^[46]使用低温等离子体处理新鲜果蔬,能完全灭活果蔬表面大肠杆菌。Lee 等^[39]等研究了超声波和紫外线-C 发光二极管(UV-C LED; 275 nm)联合处理可减缓胡萝卜、芹菜、辣椒粉和卷心菜等蔬菜中致病性大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的污染。Huang 等^[41]采用脉冲光和紫外线结合水洗涤蓝莓、番茄、生菜新鲜果蔬,能明显降低西红柿洗涤水中沙门氏菌存活率。

相较于传统杀菌而言,新型非热杀菌技术对致腐和致病菌有着优越的特异性和选择性优势,但仍存在着一定的局限性。微生物会因高压、辐射等因子诱发细胞的亚致死损伤和活的非可培养(VBNC)现象的产生^[47]。如 Nasiłowska 等^[48]研究了 HPP(300~500 MPa)处理胡萝卜汁和甜菜汁,结果发现胡萝卜汁在 400 MPa 的压力下处理 5 min 会触发李斯特氏菌的亚致死损伤,大肠杆菌会在 500 MPa 触发;在甜菜汁中,400 MPa 下处理 10 min 会导致两种菌亚致死损伤现象。因此,有关新型非热杀菌技术诱导有害菌亚致死形态和 VBNC 状态需要得到业内高度重

表 2 新型非热杀菌技术对有害微生物的杀灭效果
Table 2 Sterile effect of novel non-thermal sterilization techniques on harmful microorganisms

来源	非热杀菌技术及处理参数	有害微生物	杀灭效果	参考文献
莲藕酱	超高压HPP(150~550 MPa)+CO ₂ 包装	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i> O157:H7	低于检测限度	[34]
芒果	紫外-C辐照	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i> 阪崎肠杆菌 <i>Cronobacter sakazakii</i>	低于检测限度 减少2.4~2.6 lg CFU/g	[35]
樱桃汁	超高压(550 MPa 2 min)	霉菌、酵母	低于检测限度	[36]
萝卜	微波低温等离子体(900 W 667 Pa 10 min)	鼠伤寒沙门氏菌 <i>Salmonella typhimurium</i>	低于检测限度	[37]
	超声波US(25 kHz)+	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i> O157:H7	减少0.71 lg CFU/g	
	大气低温等离子体(400~800 Hz 1 min)	鼠伤寒沙门氏菌 <i>Salmonella typhimurium</i>	减少0.59 lg CFU/g	
Feijoa果泥	超高压HPP(400/250/200 MPa; 4/2 min)+密集相CO ₂ (0.4% w/w)	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i> 枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> 酿酒酵母 <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	减少1.7~4.3 lg CFU/g 减少>6.5 lg CFU/g 减少4.7~6.2 lg CFU/g	[38]
胡萝卜 青菜	超声波US+紫外-C发光二极管UV-C LED	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i> O157:H7 大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i> O104:H4 产肠毒素a的金黄色葡萄球菌 enterotoxin A-producing <i>S. aureus</i>	均低于检测限度	[39]
苹果汁	超高压HPP(600 MPa 7 min) 脉冲电场PEF(0.76 kV/cm 40 ℃ 2 μs/个共21个脉冲)	酿酒酵母 <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	低于检测限度	[40]
蓝莓	脉冲光PL(0.15 J/cm ² 和 0.3 J/cm ² ; 3脉冲/s)+洗涤水 紫外线(~13和28 mW/cm ²)+洗涤水	沙门氏菌 <i>Salmonella</i>	减少4.5~5.7 lg CFU/g	[41]
番茄	超高压HPP(600 MPa 7 min) 脉冲电场PEF(0.76 kV/cm 40 ℃ 2 μs/个共21个脉冲)	酿酒酵母 <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	减少4.4~5.4 lg CFU/g	[40]
生菜	脉冲光PL(每脉冲~0.15和0.3 J/cm ² ; 3脉冲/s)+洗涤水 紫外线(~13和28 mW/cm ²)+洗涤水	沙门氏菌 <i>Salmonella</i>	减少1.9~3.1 lg CFU/g	[41]

视, 探明不同非热杀菌技术诱导的机制, 对规避食品安全风险具有重要意义。

2.1.2 新型非热杀菌技术对有益微生物的作用 益生菌在发酵过程中产生细菌素、胞外多糖、多酚类物质、酶等多种功效成分, 使得发酵果蔬制品具有改善营养健康、调节胃肠道功能等作用^[49]。因此在使用新型非热杀菌技术杀灭有害微生物的同时仍需保留有益微生物的数量, 改善发酵果蔬制品的功能性作用。目前, 国内外许多研究已证明新型非热杀菌技术对乳酸菌的影响较小, 甚至改善乳酸菌发酵。如 Zhang 等^[50]研究了低温等离子体(700 W/120 s)、脉冲强光杀菌(1.0 Hz/600 J/10 次)处理植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)发酵的枣汁益生菌饮料, 结果表明, 与未杀菌处理相比, *L. plantarum* 在枣汁中的生长能力不受两种杀菌处理的影响, 甚至更有利于提高枣汁发酵性能的稳定。刘秋豆^[51]使用紫外辅助超声波处理发酵芒果汁, 结果显示与水浴灭菌相比, 紫外辅助超声波灭菌后植物乳杆菌、嗜热链球菌、鼠李糖乳杆菌、嗜酸乳杆菌的增殖倍数更高, 且紫外辅助超声波灭菌处理后, 益生菌总数显著高于水浴灭菌中益生菌总数。Ma 等^[52]比较了 HPP 和巴氏杀菌后苹果汁发酵中 *L. plantarum* 的存活率, 经 HPP 处理后, 该菌种的生存能力增加了约 2 lg CFU/g, 改善了苹果汁发酵特性。

2.2 影响杀菌效果的因素

新型非热杀菌技术涉及的杀菌原理极其复杂, 其杀菌效果受到多种因素的影响, 主要包括温度、pH 等环境因素和电压、功率、时间等处理参数的影响。

2.2.1 环境因素 杀菌时, 温度、pH 等环境因素对新型非热杀菌技术的杀菌效果有显著的影响。不同

温度、不同 pH 条件下会导致微生物对新型非热杀菌技术的压力、电磁、光辐射以及活性粒子等敏感性会有所不同, 呈现出的杀菌效果也会有所差异。例如, 朱香濤等^[53]使用超高压杀菌技术对西番莲果汁进行杀菌, 当果汁环境温度在 42.5 ℃ 时, 能将果汁中的微生物全部杀灭。钱静亚等^[54]研究了枯草芽孢杆菌介质温度对脉冲磁场杀菌效果的影响, 发现低温和高温条件下均可强化磁场的杀菌效果, 对细胞膜的破坏性更为严重。Muranyi 等^[55]研究发现, 低温等离子体在 pH5 的偏酸性条件下可将芽孢杆菌数量减少 4.7 lg CFU/g; 而中性 pH 下仅减少 2.1 lg CFU/g。洪晨等^[56]研究不同 pH 下脉冲强光对大肠杆菌的影响时, 发现当 pH4 和 pH8 时, 目标菌数量均降低 3 个以上, 而中性 pH 下仅减少 2 个。综上所述, 在保证食品质量与安全的前提下, 科学性地改变食品基质的温度、pH 等环境因素可有效提高非热杀菌技术对有害菌的抑制能力。

2.2.2 技术因素 发酵果蔬制品中大多数产品都是多菌共酵体系下的结果, 为了达到预期杀菌目的, 新型非热杀菌技术需要设置一定的杀菌参数并结合杀菌动力学研究, 破坏微生物细胞壁、膜等结构、损伤蛋白质及酶活性等方面达到杀灭不同种类微生物的目的。新型非热杀菌技术大多是处理压力、功率与时间等技术参数会对杀菌效率产生影响。

压力、功率与时间是超高压、高压脉冲电场、高压二氧化碳、超声波灭菌、低温等离子体等新型非热杀菌技术的关键。研究显示, 压力参数越大, 时间越长, 破坏细胞膜结构、钝酶能力更强, 杀菌效果越明显。然而, 杀菌参数需要根据不同食品基质及微生物特性进行合理设计。如 Feng 等^[57]为了最大程度保

证果汁品质并杀灭微生物,选择超高压杀菌技术和超声波技术于草莓-苹果-柠檬汁混合果汁中,通过多次实验后,得出在超高压压力及时间参数设置为 500 MPa/15 min 及超声功率设置在 376 W/10 min 时,才能最大限度降低霉菌及大肠杆菌数量。Fan 等^[58]研究了将微波功率设置为 3250 W/30 s 可最适合用于制备低盐豆腐的参数。Wu 等^[59]使用低温等离子体处理樱桃时,与过强的等离子体强度参数(80 kV/80 s 和 60 kV/140 s)相比,在 60 kV/30 s 或 100 s 时是杀灭樱桃表面微生物和保证外观平整的最优参数。孙新^[60]研究了高密度二氧化碳(HPCD)处理胡萝卜泡菜时菌落总数和乳酸菌总数的减菌效果与压力和时间呈正相关,然而 HPCD 处理条件为 20 MPa、30 min 时,在减菌、质构、细胞完整性和营养保留方面起到的促进作用明显优于较高或较低的处理条件。

虽然在大多数情况下,压力、功率、时间等技术参数与杀菌效果成正比,但考虑到时间成本及食品特性等问题,非热杀菌技术的参数需要进行合理设计才能达到最理想的灭菌状态。

3 新型非热杀菌技术对发酵果蔬制品品质的影响

3.1 质量属性

3.1.1 营养品质 膳食纤维和维生素、酚类化合物、黄酮类化合物等生物活性物质都是发酵果蔬制品的重要营养成分。这些营养成分常在杀菌及贮藏过程中发生流失,非热杀菌技术不仅可以保留维生素、酚类、黄酮类等活性物质,还能改善不溶性膳食纤维等营养成分^[23]。

不溶性膳食纤维(IDF)是膳食纤维的一种,具有促进肠道蠕动,改善肠道菌群以等有益的生理作用,但其颗粒尺寸较大会对感官特性和功能有不利影响,需要适度改善尺寸大小促进摄取。研究表明,新型非热杀菌技术不仅可以保留总膳食纤维含量,还能改善不溶性膳食纤维结构。如 Yu 等^[61]采用超高压技术处理泡菜,与空白对照相比,实验组泡菜中 IDF 结构更松散,晶体强度和热稳定性更低,明显改善了 IDF 结构及功能。Feng 等^[62]采用电子辐照处理大豆中不溶性膳食纤维,发现电子辐射技术可以破坏 IDF 晶体的结构,在 6 kGy 剂量的电子辐照下可以得到 IDF 的最小颗粒和最大比表面积,增加表观黏度,改善大豆中 IDF 功能。Chen 等^[63]采用高静水压处理卷心菜粉,其总膳食纤维含量($36.06\% \pm 1.65\%$)明显高于未经处理的卷心菜粉。李爽^[64]采用超声波处理发酵豆渣,得出经超声波处理后豆渣膳食纤维粒径减小,表面积增加,豆渣纤维表面变得疏松多孔,显著提升了发酵豆渣膳食纤维的持水、持油及膨胀能力。

维生素 C 作为果蔬中最为主要的营养成分,由于其热稳定性低,易于氧化等特性,在加工中需避免高温、曝气等过程导致维生素 C 发生不利变化。目

前,已有研究证明,部分非热杀菌技术能最大限度保留果蔬中维生素 C 含量,但对发酵产品中的维生素 C 含量及影响机制还尚不明确。如 Mieszcakowska-Frąc 等^[65]在分析创新技术对水果和蔬菜产品维生素 C 含量影响的研究中表示,超高压(HPP)、超声波(US)、脉冲电场(PEF)同巴氏杀菌相比,对新鲜果蔬中维生素 C 有显著的保护潜力。李树锦等^[66]利用辐照技术于苦瓜和圣女果中,结果显示辐照技术对维生素 C 的影响并不明显。

此外,使用非热杀菌技术还能保留并增加其他活性物质(如酚类化合物、胡萝卜素、类黄酮等)。例如,Viavava 等^[67]评估了静态和多脉冲轻强度高静压处理胡萝卜,结果发现,经过处理后的胡萝卜游离酚类和结合酚类分别增加了 163.05%、36.95%,类胡萝卜素中的总叶黄素增加了 27.61%。还有研究发现低温等离子体处理后有利于发酵红葡萄酒的酚类化合物的保存^[68]。Yuan 等^[69]研究了低温等离子体、超高压、高压二氧化碳作为预处理对真空冻干枣片性能的影响,发现非热杀菌技术对冻干枣片总苯酚含量、总类黄酮、抗坏血酸含量和抗氧化能力均显示提升。

以上研究结果表明,新型非热杀菌技术不仅能保留还能改善果蔬原料及发酵产品的营养品质,还能有效避免或减少传统热处理对生物活性化合物的不良影响。

3.1.2 感官品质 发酵果蔬制品的感官品质对于消费者来说尤为重要,其风味(包括滋味、气味)、色泽、质地等都会直接影响消费者对发酵果蔬制品好坏的判定。发酵果蔬制品在贮藏过程中通常会因微生物组成结构的不稳定导致质构软化、色泽褐变、风味过酸或出现异味等现象。研究表明,新型非热杀菌技术是最大限度保持并能改善发酵果蔬制品的风味、色泽、质地等感官品质的加工杀菌技术。

风味是发酵产品品质的核心和灵魂,其特定的挥发性风味物质可为发酵果蔬制品的独特的气味做出巨大贡献;非挥发性物质(糖类、有机酸、氨基酸等)可为发酵果蔬制品的滋味提供物质基础^[70]。杜喜玲^[71]检测了泡菜在不同压力参数下的超高压技术处理后的风味物质,结果发现在一定的压力时间下,超高压技术处理大大增加了风味物质的种类与数量(醇类、酯类、酚类)。Yuan 等^[72]研究了超高压技术生产腌制的中国莲藕片的风味物质,与空白组的腌莲藕片产生 18 种挥发性化合物相比,HPP 处理后的莲藕片产生了 32 种更利于风味的挥发性化合物。高苏敏等^[73]研究了超声波协同低盐处理萝卜泡菜,与传统自然腌制泡菜相比,相同盐含量下,超声波组泡菜水中有机酸和游离氨基酸含量更高,挥发性风味物质种类更丰富,并在超声波组样品中检测出的二甲基三硫阈值小,对风味贡献更大。综上,新型非热杀菌技术在改善发酵果蔬风味物质的方面起到了积极作用。

色泽也是发酵果蔬制品重要的品质属性之一^[74]。在果蔬中,花青素发挥着重要作用,是最大、最多样化的植物色素组,负责各种水果和蔬菜的红色、紫色和蓝色等色泽。Marszalek 等^[75]研究对比了超高压处理、高压二氧化碳、高压均质化三种高压技术对果蔬中花青素的影响,指出三种技术均能在一定程度上减少花青素的流失,而高压二氧化碳对花青素在加工和储存过程中流失更少。Ma 等^[76]研究巴氏杀菌、臭氧、超声波、高压静水压力处理后李子汁的褐变程度及颜色变化,结果表明高压静水压力灭菌处理后的李子汁褐变程度最小。

质地也是腌制工艺类发酵果蔬制品的重要感官指标。对于泡菜而言,爽脆的质地更受到人们的喜爱,而温度、酸度、微生物是导致泡菜质地变软的主要因素。新型非热杀菌技术不仅可避免因加热导致果蔬软化,同时也能杀灭引起质构软烂的微生物。例如微波杀菌可作为茼蒿泡菜的杀菌方式应用于生产,与巴氏杀菌泡菜相比,微波杀菌可明显提升泡菜硬度及弹性^[77]。赵楠等^[78]使用微波辅助低温等离子体处理榨菜,与巴氏杀菌相比,榨菜硬度和质地明显提升 34% 和 44%,改善了榨菜贮藏期质构软化问题。

目前,大量实验室研究已证实新型非热杀菌对发酵果蔬感官品质的影响较小,甚至起到积极作用,但由于扩大化生产技术及生产设备的限制,仍需逐步探索适用于发酵果蔬制品规模化生产的非热杀菌技术,维持产品品质。

3.2 安全属性

果蔬在发酵过程中,含氮物质在微生物的作用下产生亚硝酸盐和生物胺,过量的摄入会严重影响人类身体健康,致使中毒、癌症甚至死亡,危害产品安全品质。与传统杀菌技术相比,新型非热杀菌技术的应用具有压低亚硝峰、减缓生物胺积累的效果。

研究证明新型非热杀菌技术可以减缓发酵果蔬制品中亚硝酸盐的产生,使其稳定在国家安全食品标准(<20 mg/kg)范围内。李昌宝等^[79]研究了巴氏杀菌、微波杀菌、臭氧杀菌三种杀菌方式对低盐腌渍黄瓜的亚硝酸盐含量的影响,发现微波杀菌和臭氧杀菌更可将亚硝酸盐含量降低至 0.31 mg/kg。王媛^[80]研究了低温等离子体于泡菜发酵过程中亚硝酸盐的消长机制,与未经过处理的空白组发酵液(发酵 3 d 达 28.51 mg/L, >20 mg/kg 的国家标准)对比,经等离子体处理后的泡菜发酵液亚硝酸盐含量一直保持在国家标准范围内,且在整个发酵过程中未出现“亚硝峰”。

生物胺是一种对人类健康产生负面影响的含氮化合物,其含量主要是由于酵母或乳酸菌等微生物代谢产生氨基酸脱羧后的结果。新型非热杀菌技术在减缓生物胺的积累呈现优势。Niedźwiedz 等^[81]研究了低温等离子体技术对红葡萄酒酚醛成分和生物胺含量的影响,与传统保存方法(添加 30 和 100 mg/L 的亚硫酸钾)和联合方法(30 mg/L 亚硫酸钾组合低

温等离子体)进行比较,结果表明低温等离子体处理后,在贮藏期生物胺的含量呈现出下降的结果。

4 结论与展望

新型非热杀菌技术大多采用物理方法进行杀菌,具有低温、高效、穿透力强、安全无残留等特点,因而被广泛应用于果蔬原料灭菌中。新型非热杀菌技术在果蔬制品杀菌时表现出了优越的微生物特异性、选择性,可对致病、致腐微生物进行选择性的杀灭或减除,并保留益生乳酸菌。在合适的温度、pH 等环境条件下,合理设置参数或协同其他杀菌技术可以明显提高杀菌效果。还可以达到保留蔬菜营养品质(维生素 C、膳食纤维等)风味、色泽、质地等感官品质的目的,同时保证产品安全性,因而为发酵果蔬制品的健康化、安全化生产提供了技术保障。

然而,由于扩大化生产技术及配套设备的限制,新型非热杀菌技术在发酵果蔬制品工业中的规模化应用仍较少,其中辐射灭菌、微波灭菌、臭氧灭菌技术等的应用普遍成熟,低温等离子体灭菌技术、超高压灭菌技术、高压二氧化碳灭菌技术等技术尚未实现工业化,亟待开发适用于规模化、工业化发酵果蔬制品生产的高通量非热杀菌技术。此外,目前新型非热杀菌技术在发酵果蔬制品领域的应用多集中于对蔬菜原料或包装材料的杀菌或减菌,其在发酵果蔬成熟产品中的应用潜力仍待挖掘。发酵果蔬制品作为多菌共酵的复杂体系,非热杀菌工艺在发酵果蔬成品中的适应性改造将有利于其扩大杀菌范围的优势。同时,由于非热杀菌技术原理复杂,往往涉及多种因素,非热杀菌技术对于特定微生物的杀菌作用靶点、决定杀菌选择性的影响因素还认识不清,对其杀菌选择性与适用性的作用机制阐释将有助于其杀菌效果的进一步优化。因此,通过扩展新型非热杀菌技术的适用性范围,挖掘选择性杀菌的作用机制,突破杀菌效率与通量的技术瓶颈,非热杀菌技术将在发酵果蔬制品领域展现更大的应用潜力,助力发酵果蔬制品产业的高质量发展。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 全琦,刘伟,左梦楠,等.乳酸菌发酵果蔬汁的风味研究进展[J].食品与发酵工业,2022,48(1):315-23. [QUAN Q, LIU W, ZUO M N, et al. Research progress on flavor of fruit and vegetable juice fermented by lactic acid bacteria[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(1): 315-23.]
- [2] 汪铃,王亮.传统发酵蔬菜制作工艺、品质特征及影响因素研究概况[J].中国酿造,2022,41(7):21-25. [WANG L, WANG L. Research on traditional fermentation vegetable production technology, quality characteristics and influencing factors[J]. China Brewing, 2022, 41(7): 21-25.]
- [3] 何鹏晖,庠晓,钱杨,等.发酵蔬菜中腐败微生物及其防控的

- 研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(11): 374-378, 84. [HE P H, SHE X, QIAN Y, et al. Research progress of spoilage microorganisms in fermented vegetables and their control[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(11): 374-378, 84.]
- [4] 王黎明, 史梓男, 关志成, 等. 脉冲电场非热杀菌效果分析[J]. 高电压技术, 2005(2): 64-66. [WANG L M, SHI Z N, GUAN Z C, et al. Study of non-thermal microorganism inactivation by pulsed electric field[J]. High Voltage Engineering, 2005(2): 64-66.]
- [5] 周林燕, 廖红梅, 胡小松, 等. 食品非热杀菌研究中的科学问题分析[J]. 食品科学, 2010, 31(5): 328-333. [ZHOU L Y, LIAO H M, HU X S, et al. Fundamental issues of non-thermal processing in food[J]. Food Science, 2010, 31(5): 328-333.]
- [6] DENG L Z, MUJUMDAR A S, PAN Z, et al. Emerging chemical and physical disinfection technologies of fruits and vegetables: A comprehensive review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 60(15): 2481-2508.
- [7] VAN IMPE J, SMET C, TIWARI B, et al. State of the art of nonthermal and thermal processing for inactivation of microorganisms[J]. Journal of Applied Microbiology, 2018, 125(1): 16-35.
- [8] 李军. 鲜榨苹果汁非热杀菌技术与设备的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004. [LI J. The study on non-thermal inactivation and sterilization technology & equipment of fresh apple juice[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.]
- [9] 金思渊, 谢晶. 鲜切果蔬致腐菌抑菌技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(11): 302-306. [JIN S Y, XIE J. Research progress of bacteriostatic technology of fresh-cut fruit and vegetable rot bacteria[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(11): 302-306.]
- [10] ZHANG S, MEENU M, HU L, et al. Recent progress in the synergistic bactericidal effect of high pressure and temperature processing in fruits and vegetables and related kinetics[J]. Foods, 2022, 11(22): 3698.
- [11] 沈生文. 食品杀菌技术概述[J]. 食品安全导刊, 2020(35): 52. [SHENG S W. Overview of food sterilization techniques[J]. China Food Safety Magazine, 2020(35): 52.]
- [12] JADHAV H B, ANNAPURE U S, DESHMUKH R R. Non-thermal technologies for food processing[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 657090.
- [13] 李明月. 非热杀菌技术在肉类产品保鲜中的应用研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(20): 29-31. [LI M Y. Research progress on the application of non-thermal sterilization technology in the preservation of meat products[J]. Modern Food, 2022, 28(20): 29-31.]
- [14] 郁佳怡, 钱韻芳. 非热杀菌技术在水产品保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(9): 51-57. [YU J Y, QIAN Y F. Research progress on application of non-thermal sterilization technology in aquatic products preservation[J]. Meat Research, 2022, 36(9): 51-57.]
- [15] 宋晓雪, 胡文忠, 毕阳, 等. 鲜切果蔬中致腐微生物污染及其非热杀菌的研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(10): 351-354. [SONG X X, HU W Z, BI Y, et al. Research progress on the pollution of spoilage microorganisms in fresh-cut fruits and vegetables and their non-thermal sterilization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(10): 351-354.]
- [16] 陈多珍, 吴梦, 杨洋, 等. 非热杀菌技术在乳制品中的应用研究进展[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(1): 68-72. [CHEN D Z, WU M, YANG Y, et al. Research progress on the application of non-thermal sterilization technology in dairy products[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(1): 68-72.]
- [17] AGANOVIC K, HERTEL C, VOGEL R F, et al. Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 3225-3266.
- [18] ZHANG C, LYU X, ARSHAD R N, et al. Pulsed electric field as a promising technology for solid foods processing: A review[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134367.
- [19] SALEHI F. Application of pulsed light technology for fruits and vegetables disinfection: A review[J]. Journal of Applied Microbiology, 2022, 132(4): 2521-2530.
- [20] PANIWNKY L. Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 794-806.
- [21] HUANG M, ZHANG M, BHANDARI B. Recent development in the application of alternative sterilization technologies to prepared dishes: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(7): 1188-1196.
- [22] JIANG H, LIU Z, WANG S. Microwave processing: Effects and impacts on food components[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(14): 2476-89.
- [23] SRIRAKSHA M S, AYENAMPUDI S B, NOOR M, et al. Cold plasma technology: An insight on its disinfection efficiency of various food systems[J]. Food Science and Technology International, 2023, 29(4): 428-41.
- [24] ZHOU L, BI X, XU Z, et al. Effects of high-pressure CO₂ processing on flavor, texture, and color of foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(6): 750-768.
- [25] BUITIMEA-CANTÚA G V, RICO-ALDERETE I A, ROSTRO-ALANÍS M J, et al. Effect of high hydrostatic pressure and pulsed electric fields processes on microbial safety and quality of black/red raspberry juice[J]. Foods, 2022, 11(15): 2342.
- [26] 让一峰, 陈晓婵, 田一雄, 等. 高压脉冲电场强化杀菌对哈密瓜汁品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 49(17): 105-109. [RANG Y F, CHEN X C, TIAN Y X, et al. Effect of high voltage pulsed electric field on the quality of cantaloupe juice[J]. Food Research and Development, 2019, 49(17): 105-109.]
- [27] DANSHI Z, YUEYI Z, CHENGCHENG K, et al. Ultrasonic and other sterilization methods on nutrition and flavor of cloudy apple juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105975.
- [28] 韦雪, 郑娜燕, 赵晓燕, 等. 脉冲强光联合气调包装对鲜切马铃薯杀菌及褐变的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2022, 45(2): 110-118. [WEI X, ZHEN Y Y, ZHAO X Y, et al. Effect of pulsed strong light combined with air-conditioned packing on sterilization and browning of fresh-cut potato[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2022, 45(2): 110-118.]
- [29] 孟宪伟, 汤静, 王春飞, 等. 低温等离子体处理对鲜切胡萝卜品质及抗氧化活性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(6): 1179-1186. [MENG X W, TANG J, WANG C F, et al. Effects of cold temperature plasma treatment on quality and antioxidant activity of freshly cut carrot[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(6): 1179-1186.]
- [30] 侯新磊, 赵楠, 葛黎红, 等. 低温等离子体对低盐泡菜生花腐败的抑制及贮藏期品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 282-290. [HOU X L, ZHAO N, GE L H, et al. Effect of cold temperature plasma on flower spoilage inhibition and storage quality of low salt kimchi[J]. Food Science, 2022, 43(21): 282-290.]
- [31] LEE J H, CHOI E J, CHANG J Y, et al. Effect of high hydrostatic pressure (HHP) and supercooling storage in leaf mustard (*Brassica juncea* L.) kimchi: Modelling of microbial activity and

- preservation of physicochemical properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145: 111325.
- [32] ZAMBON A, GONZÁLEZ-ALONSO V, LOMOLINO G, et al. Increasing the safety and storage of pre-packed fresh-cut fruits and vegetables by supercritical CO₂ process[J]. *Foods*, 2022, 12(1): 21.
- [33] 高昕瑜, 吴彩云, 李天琳, 等. 植物乳杆菌发酵枣汁在冷藏期间的营养品质变化研究[J]. *中国酿造*, 2022, 41(3): 98–103.
- [GAO X Y, WU C Y, LI T L, et al. Study on nutritional quality changes of fermented jujube juice by *Lactobacillus plantarum* during cold storage[J]. *China Brewing*, 2022, 41(3): 98–103.]
- [34] ZHOU B, ZHANG L, WANG X, et al. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 by high hydrostatic pressure combined with gas packaging[J]. *Microorganisms*, 2019, 7(6): 154.
- [35] SANTO D, GRAÇA A, NUNES C, et al. *Escherichia coli* and *Cronobacter sakazakii* in 'Tommy Atkins' minimally processed mangos: Survival, growth and effect of UV-C and electrolyzed water[J]. *Food Microbiology*, 2018, 70: 49–54.
- [36] 彭思嘉, 侯志强, 徐贞贞, 等. 超高压和高温短时杀菌对樱桃汁品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(17): 71–78.
- [PEN S J, HOU Z Q, XU Z Z, et al. Effects of high pressure and high temperature short time sterilization on the quality of cherry juice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(17): 71–78.]
- [37] OH Y J, SONG A Y, MIN S C. Inhibition of *Salmonella typhimurium* on radish sprouts using nitrogen-cold plasma[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 249: 66–71.
- [38] TRANG D, MURAT B, CONRAD P, et al. Microbial and sensory effects of combined high hydrostatic pressure and dense phase carbon dioxide process on feijoa puree[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(11): 2478–2485.
- [39] LEE J Y, YANG S Y, YOON K S. Control measures of pathogenic microorganisms and shelf-life extension of fresh-cut vegetables[J]. *Foods*, 2021, 10(3): 655.
- [40] MARX G, MOODY A, BERMÚDEZ-AGUIRRE D. A comparative study on the structure of *Saccharomyces cerevisiae* under nonthermal technologies: high hydrostatic pressure, pulsed electric fields and thermo-sonication[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2011, 151(3): 327–337.
- [41] HUANG R, CHEN H. Comparison of water-assisted decontamination systems of pulsed light and ultraviolet for *Salmonella* inactivation on blueberry, tomato, and lettuce[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(5): 1145–1150.
- [42] 赵虎威, 陈燕飞, 燕平梅. 泡菜发酵中微生物的研究[J]. *中国调味品*, 2022, 47(1): 211–216.
- [ZHAO H W, CHEN Y F, YAN P M. Study on microorganisms in pickle fermentation[J]. *China Condiment*, 2022, 47(1): 211–216.]
- [43] ZHAO N, GE L, HUANG Y, et al. Impact of cold plasma processing on quality parameters of packaged fermented vegetable (*Radish paocai*) in comparison with pasteurization processing: Insight into safety and storage stability of products[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 60: 102300.
- [44] 邓扬龙. 郫县豆瓣中产气微生物的分离、鉴定及其生物特性研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.
- [DENG Y L. Isolation, identification and biological characteristics of aerated microorganisms from Pixian Douban [D]. Chengdu: Xihua University, 2020.]
- [45] MARIK C M, ZUCHEL J, SCHAFFNER D W, et al. Growth and survival of *Listeria monocytogenes* on intact fruit and vegetable surfaces during postharvest handling: A systematic literature review[J]. *Journal of Food Protection*, 2020, 83(1): 108–128.
- [46] PAN Y, CHENG J H, SUN D W. Cold plasma-mediated treatments for shelf life extension of fresh produce: A review of recent research developments[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(5): 1312–1326.
- [47] SCHOTTROFF F, FRÖHLING A, ZUNABOVIC-PICHLER M, et al. Sublethal injury and viable but non-culturable (VBNC) state in microorganisms during preservation of food and biological materials by non-thermal processes[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 2773.
- [48] NASIŁOWSKA J, SOKOŁOWSKA B, FONBERG-BROCEK M. Long-term storage of vegetable juices treated by high hydrostatic pressure: Assurance of the microbial safety[J]. *Biomed Research International*, 2018, 2018: 7389381.
- [49] 丁楠, 何美珊, 戈子龙, 等. 果蔬发酵制品的功效及应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(7): 332–336.
- [DING N, HE M S, GE Z L, et al. Research progress on efficacy and application of fruit and vegetable fermented products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(7): 332–336.]
- [50] ZHANG L H, ZHA M M, LI S F, et al. Investigation on the effect of thermal sterilization versus non-thermal sterilization on the quality parameters of jujube juice fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59(10): 3765–3774.
- [51] 刘秋豆. 益生菌发酵芒果汁的研制及其理化性质分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [LIU Q D. Preparation and physicochemical properties of mango juice fermented by probiotics[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.]
- [52] MA J, WANG Y, ZHAO M, et al. High hydrostatic pressure treatments improved properties of fermentation of apple juice accompanied by higher reserved *Lactobacillus plantarum*[J]. *Foods*, 2023, 12(3): 441.
- [53] 朱香蕊, 段振华, 刘艳, 等. 西番莲果汁饮料超高压灭菌工艺优化[J]. *食品工业*, 2018, 39(11): 12–18.
- [ZHU X H, DUAN Z H, LIU Y, et al. Optimization of ultra high pressure sterilization process for passionflower juice beverage[J]. *The Food Industry*, 2018, 39(11): 12–18.]
- [54] 钱静亚, 陈超, 王晨燕, 等. 介质参数对脉冲磁场杀灭枯草芽孢杆菌的影响[J]. *食品与机械*, 2012, 28(5): 8–11.
- [QIAN J Y, CHEN C, WANG C Y, et al. Effect of medium parameters on killing *Bacillus subtilis* by pulsed magnetic field[J]. *Food and Machinery*, 2012, 28(5): 8–11.]
- [55] MURANYI P, WUNDERLICH J, HEISE M. Influence of relative gas humidity on the inactivation efficiency of a low temperature gas plasma[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, 104(6): 1659–1666.
- [56] 洪晨, 潘忠礼, 王蓓, 等. 脉冲强光对大肠杆菌的灭活效果及其动力学模型的建立[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(18): 105–109, 116.
- [HONG C, PAN Z L, WANG P, et al. Inactivation effect of pulsed light on *Escherichia coli* and the establishment of its kinetic model[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(18): 105–109, 116.]
- [57] FENG X, ZHOU Z, WANG X, et al. Comparison of high hydrostatic pressure, ultrasound, and heat treatments on the quality of strawberry-apple-lemon juice blend[J]. *Foods*, 2020, 9(2): 218.
- [58] FAN X, LÜ X, MENG L, et al. Effect of microwave sterilization on maturation time and quality of low-salt sufu[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(1): 584–593.
- [59] WU X, ZHAO W, ZENG X, et al. Effects of cold plasma treatment on cherry quality during storage[J]. *Food Science and*

Technology International, 2021, 27(5): 441–455.

[60] 孙新. 高密度二氧化碳处理对胡萝卜泡菜品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017. [SUN X. Effect of high density carbon dioxide treatment on quality of carrot pickle[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.]

[61] YU Y, ZHAO J, LIU J, et al. Improving the function of pickle insoluble dietary fiber by coupling enzymatic hydrolysis with HHP treatment[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59(12): 4634–4643.

[62] FENG X, CHEN H, LIANG Y, et al. Effects of electron beam irradiation treatment on the structural and functional properties of okara insoluble dietary fiber[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(1): 195–204.

[63] CHEN Y R, WU S J. Effects of high-hydrostatic pressure and high-pressure homogenization on the biological activity of cabbage dietary fiber[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(14): 6299–6308.

[64] 李爽. 超声处理及纳豆芽孢杆菌发酵对豆渣不溶性膳食纤维改性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022. [LI S. Study on modification of insoluble dietary fiber from soybean residue by ultrasonic treatment and *Bacillus natto* fermentation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.]

[65] MIESZCZAKOWSKA-FRĄC M, CELEJEWSKA K, PŁOCHARSKI W. Impact of innovative technologies on the content of vitamin C and its bioavailability from processed fruit and vegetable products[J]. *Antioxidants (Basel)*, 2021, 10(1): 54.

[66] 李树锦, 高美须, 刘超超, 等. 辐照对鲜切蔬菜维生素C及亚硝酸盐的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(9): 224–230. [LI S J, GAO M X, LIU C C, et al. Effects of irradiation on vitamin C and nitrite in fresh-cut vegetables[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(9): 224–230.]

[67] VIACAVA F, RAMOS-PARRA P A, WELTI-CHANGES J, et al. High hydrostatic pressure processing of whole carrots: Effect of static and multi-pulsed mild intensity hydrostatic pressure treatments on bioactive compounds[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 219.

[68] NIEDŹWIEDŹ I, SIMEONOV V, WAŚKO A, et al. Comparison of the effect of cold plasma with conventional preservation methods on red wine quality using chemometrics analysis[J]. *Molecules*, 2022, 27(20): 7048.

[69] YUAN L, LAO F, SHI X, et al. Effects of cold plasma, high hydrostatic pressure, ultrasound, and high-pressure carbon dioxide pretreatments on the quality characteristics of vacuum freeze-dried jujube slices[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 90: 106219.

[70] 黄玉立, 赵楠, 黄庆, 等. 发酵蔬菜风味物质形成机制及影响因素研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 279–285. [HUANG Y L, ZHAO N, HUANG Q, et al. Research progress on the formation mechanism and influencing factors of fermented vegetable flavor substances[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(24): 279–285.]

[71] 杜喜玲. 超高压处理对泡菜风味的影响[J]. *食品安全导刊*, 2017(24): 99. [DU X L. Effect of ultra-high pressure treatment on flavor of kimchi[J]. *China Food Safety Magazine*, 2017(24): 99.]

[72] YUAN L, XU F, XU Y, et al. Production of marinated chinese lotus root slices using high-pressure processing as an alternative to traditional thermal-and-soaking procedure[J]. *Molecules*, 2022, 27(19): 6506.

[73] 高苏敏, 吴丹璇, 高子武, 等. 超声波协同低盐处理对萝卜泡菜水菌群分布和特征风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(15): 154–163. [GAO S M, WU D X, GAO Z W, et al. Effects of ultrasonic combined with low salt treatment on the distribution of water bacteria and characteristic flavor of radish pickles [J]. *Food and Fermentation Industries* 2022, 48(15): 154–163.]

[74] 杨姗, 王卫, 赵楠, 等. 发酵蔬菜色泽形成机制及影响因素研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(23): 269–276. [YANG S, WANG W, ZHAO N, et al. Research progress on color formation mechanism and influencing factors of fermented vegetables[J]. *Food Science*, 2022, 43(23): 269–276.]

[75] MARSZAŁEK K, WOŹNIAK Ł, KRUSZEWSKI B, et al. The effect of high pressure techniques on the stability of anthocyanins in fruit and vegetables[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(2): 277.

[76] MA Y, XU Y, CHEN Y, et al. Effect of different sterilization methods on the microbial and physicochemical changes in prunus mume juice during storage[J]. *Molecules*, 2022, 27(4): 1197.

[77] 刘莹萍, 崔莉, 牛丽影, 等. 微波对植物乳杆菌的杀灭作用及其在茼蒿泡菜中的应用[J]. 食品工业科技, 2016, 37(24): 245–248. [LIU Y P, CUI L, NIU L Y, et al. The killing effect of microwave on *Lactobacillus plantarum* and its application in lettuce pickle[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(24): 245–248.]

[78] 赵楠, 葛黎红, 张恺熹, 等. 微热辅助低温等离子体杀菌技术对榨菜贮藏期品质劣变的影响[J]. 中国酿造, 2023, 42(2): 151–156. [ZHAO N, GE L H, ZHANG K X, et al. Effect of mild heating-assisted cold plasma sterilization on quality deterioration of zha-cai during storage[J]. *China Brewing*, 2023, 42(2): 151–156.]

[79] 李昌宝, 辛明, 孙宇, 等. 杀菌方式对低盐腌渍黄瓜的品质影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(12): 14–20. [LI C B, XIN M, SUN Y, et al. Effect of sterilization method on the quality of pickled cucumber with low salt[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(12): 14–20.]

[80] 王媛. 非热等离子体作用下的泡菜亚硝酸盐生成及降解的微生物调控[D]. 镇江: 江苏大学, 2022. [WANG Y. Microbial regulation of nitrite production and degradation in kimchi under non-thermal plasma[J]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.]

[81] NIEDŹWIEDŹ I, PŁOTKA-WASYŁKA J, KAPUSTA I, et al. The impact of cold plasma on the phenolic composition and biogenic amine content of red wine[J]. *Food Chemistry*, 2022, 381: 132257.